# 平滑試験片の疲労強度に及ぼす表面積の影響について

The Effect of the Surface Area of Plane Specimens on Their Fatigue Strength

伊藤吉保\*小林正木\*
Yoshiyasu Itô Masaki Kobayashi

# 内 容 梗 概

切欠きのない平滑な疲労試験片の曲げあるいはねじり疲労強度には、試験片の寸法によって疲労強度が異なる現象、すなわち寸法効果が認められることが古くから知られている。本報告では、このうち従来あまり調べられていなかった破壊の危険にさらされる表面積の大小による寸法効果を明らかにするため、平行部長さを異にする試験片(円断面)の曲げ疲労強度および三角形断面をした試験片の平面曲げ疲労強度を up and down 法により求めた。この結果、破壊の危険にさらされる表面積の大小による寸法効果が存在し、その程度が比較的大きいことがわかった。また、この寸法効果は、Weibull 分布関数を用いて計算される傾向とよく一致した。特に直径  $9 \, \mathrm{mm} \, \phi$ 、平行部長さ  $45 \, \mathrm{mm}$  の回転曲げ試験片の疲労強度が  $13 \, \mathrm{kg/mm^2}$  であったのに対し、破壊の危険にさらされる表面積がその 1/1,500 程度に減少したものの疲労強度は約  $15 \sim 16 \, \mathrm{kg/mm^2}$  にもなる。このことは鋳造材のピンホール、き裂など、きわめて微少な欠陥による疲労強度の低下率を研究する上に重要なことと思われる。

# 1. 緒 言

寸法の大きい試験片の疲労強度は、一般に、小さい寸法の試験片の疲労強度より低くなり、いわゆる寸法効果が存在する。特に、切欠きをもった試験片においては、この効果は顕著であり、多くの研究がなされている<sup>(1)</sup>。また、切欠きのない平滑な試験片においても、曲げ、ねじりに対する疲労強度では寸法効果が認められている<sup>(2)</sup>。これら寸法効果の原因としては

- (1) 試験片表面付近の応力こう配
- (2) 試験片表面層の残留応力
- (3) 破壊の危険にさらされる部分の表面積の大きさ

などが考えられている。(1)の影響については従来詳しく調べら れ、その程度がかなり大きいことが示されており(2)、日立製作所内 においても軟鋼,中炭素鋼, Ni-Cr 鋼の切欠き試験片につき詳細な 研究が行なわれている $^{(3)}$ 。しかし(2),(3)については,いまだ詳し く求められていない。筆者らの知る範囲では、(3)の影響について Weibull の実験(4)がある程度である。これは、平行部長さ25,50 mm の二種類の回転曲げ試験片に一定荷重を加えた場合の疲労寿命を, 球軸受鋼について比較し,両者の疲労寿命に差があること,この差 は、Weibull の分布関数を用いて説明し得ることを示したものであ る。しかし工学上は、107の繰り返しに耐える疲労強度に対する寸 法効果を求めておいた方が便利であり、また、さらに広範囲に試験 片表面積を変化させた場合の寸法効果の程度, および, それらが Weibullの分布関数から計算される傾向と一致するか否かを調べる ことが寸法効果の研究には是非必要であると考えた。そこで筆者ら は、アルミニウム合金について、試験片表面付近の応力こう配を同 じにし,破壊の危険にさらされる部分の表面積の大小と疲労強度の 関係を調べた。すなわち、 $9 \text{ mm} \phi$  で平行部長さがそれぞれ 45, 25, 10, 0mm の回転曲げ疲労試験片と,一辺 9mm の正三角形断面を した繰返し曲げ試験片のおのおのの疲労強度を up and down 法に より求め、寸法効果の程度を明らかにした。また、この結果と Weibull の分布関数から計算される値とを比較した。 その結果につ き報告する。

# 2. 供試材料および試験片

供試材料は、内燃機関用ピストンに用いられる Lo-Ex 系アルミニュウム合金で、JIS の H 5202 に規定された AC 8 A 合金である。

第1表 供試材料の化学成分 (%)

Si	Cu	Mg	Ni	Fe	Al
12.09	1.40	1.04	1.05	0.65	残

#### 第2表 材料の機械的性質

熱 処 理 条 件	縦弾性係数 (kg/mm²)	引 張 強 さ (kg/mm²)	耐力(0.2% 残)	伸 (%)	7	
520℃ 6 時間保持後 } 60℃水冷 } 220℃ 8 時間保持後 } 空冷	8,120	29.5	28.5	0.6		

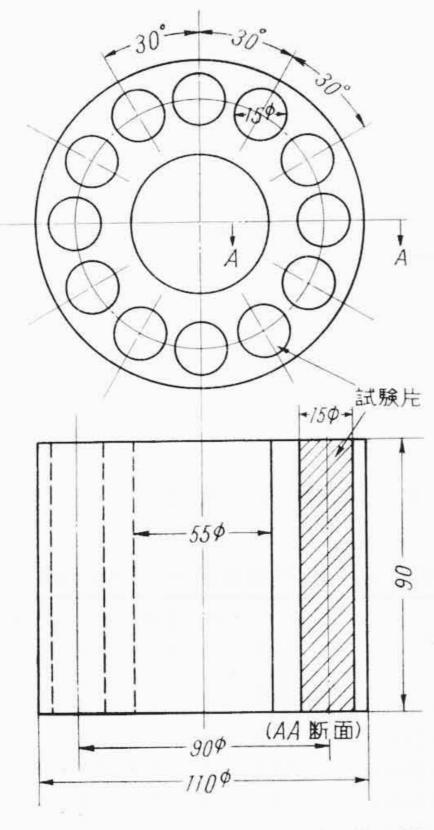


第1図 試験片の顕微鏡組織 (×100)

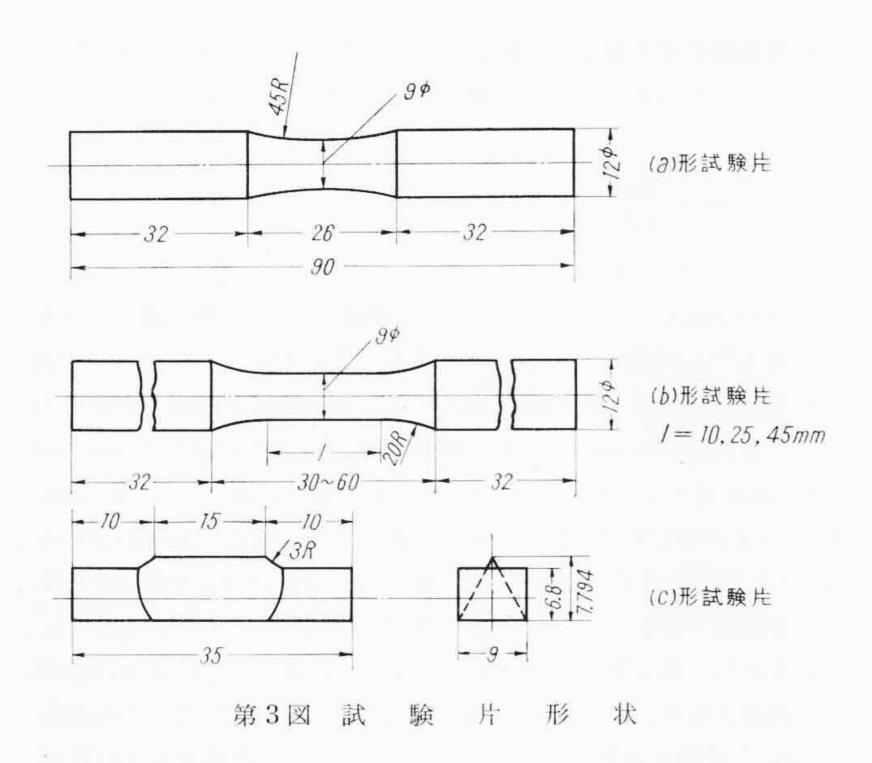
供試材料の化学成分を第1表に、熱処理条件および室温における機械的性質を第2表に示す。また、試験片採取位置における顕微鏡組織を第1図に示した。材料は冷却水室をもうけた鋳鉄製金型で鋳造し、その金型に接した部分から試験片を採取したので、試験片採取位置における凝固速度は約0.4~0.6 mm/s であった。すなわち、鋳造素材は第2図に示す中空円筒形をしており、その外側筒面は鋳鉄金型で冷却され、内側筒面は砂型に接している。また鋳造時に発生する微小な鋳造欠陥を除くため、再溶解脱ガス法をCl₂脱ガス法に併用して、溶湯の脱ガスを十分に行ない、初晶Siを微細化するため微量のPCl₅を添加した。試験片は、第2図のように一鋳造素材から12本採取した。

疲労試験片としては第3図に示したような3種類の形状のものを用いた。(a),(b)形は回転曲げ疲労試験片で,(a)形は平行部長さl=0 mm,(b)形は平行部長さl=10,25,45 mmの三種類とし

<sup>\*</sup> 日立製作所笠戸工場



第2図 試験片採取位置



た。(c)形は試験部が正三角形断面をした繰返し曲げ試験片で、破壊の危険にさらされる部分の表面積は、(a)、(b)形試験片に比べてはるかに小さい。(a)、(b)形試験片は旋削後0/6ペーパ仕上げとし、(c)形試験片はミーリング加工のままとした。

#### 3. 試 験 方 法

疲労限度の決定はすべて up and down 法  $^{(5)}$ により行ない,各形状の試験片の,室温における  $10^7$  回の繰り返しに対する時間疲労強度を求めた。従来,up and down 法によって疲労強度の平均値およびばらつきを求める場合, 試験片は最低  $30{\sim}40$  本は必要であるとされてきたが, 試験片本数が 10 本前後であっても平均値の推定精度は比較的よいことが最近明らかになっている  $^{(6)}$ 。それゆえ,本研究においては,各形状の試験片を第3表のように選んで実験を行なった。 同表中 No.1 チャージとあるのは,溶湯のチャージのちがいによる再現性をみるため, 2 チャージにつき同様の実験を行なったものである。すなわち, No.1 の溶湯から 8 個の鋳造素材(第2 図参照)を同じ条件で鋳造し,これらを No.1 チャージと総称した。これら 8 個の鋳造素材から試験片を採取するにあ

第3表 実験に供した試験片本数

試験片形状		片形 状	No.1 ++->	No.2 チャージ	
a	形		18	24	
b	形	( <i>l</i> =10mm)	18	12	
b	形	(l=25 mm)	18	12	
b	形	(l=45 mm)	18	24	
с	形		-	12	

たっては、特定の形状の試験片が一つの素材にかたよらぬよう、8 個の鋳造素材から80本の試験片素材を切り出し、この中からラン ダムに(a)形,(b)形の試験片を作った。No.2チャージについて も同様である。ただ、(c)形試験片は(a)形試験片の試験終了後, そのチャック部から試験片を採取した。試験片は、すべて機械加工 後染色探傷を行ない、表面欠陥が認められるものは実験から除外し た。除外された試験片は全数の10%以下であった。これは、内燃 機関用ピストンなどにおいても、応力の高い重要な部分には染色探 傷を行ない、表面に欠陥が認められるものは不良品として除外して いることに準じたものである。第3表に示した試験片本数は、これ ら欠陥材を除外したものである。(a), (b)形試験片の疲労強度は 小野式回転曲げ試験機で,また(c)形試験片の強度はシエンク型繰 返し曲げ試験機を用いて求めた。繰返し速度はいずれも1分間3,000 回であった。また実験はできる限り1台の試験機(以下これを No.1 試験機と呼ぶ)を用いて行なったが、No.2 チャージの(a)形およ び(b) 形 l=45 mm のものは試験片本数が 24 本で多いため、この うち12本を No.1 試験機で実験し、残り12本は別の No.2 試験機 で並行して実験を行なった。

#### 4. 実験結果および考察

# 4.1 実験結果

up and down 法 (あるいは stair case 法ともいう) による実験結 果から疲労強度の平均値(m)および標準偏差 $(\sigma)$ を推定するにさき だち, up and down 法を簡単に説明する。まず、予想される疲労 強度付近のある応力振幅  $x_0$  で 1 本目の疲労試験を行なう。この試 験片が  $10^7$  回までに破壊しなければ、 $x_1(=x_0+d)$  以下 d を応力レ ベルの段階と呼ぶ、kg/mm²)の応力振幅で2本目の試験片につき 疲労試験を行なう。また1本目の試験片が107以下で破壊すれば、 2本目の試験片は $x_{-1}=x_0-d$ なる応力振幅で試験する。ここで $x_0$ ,  $x_1, x_{-1}$  を応力レベルという。次に2本目の試験片が $x_1$  の応力振幅 で試験された場合,これが107までに破壊するかしないかにより3 本目の試験片の応力振幅を $x_1+d=x_0+2d$  かあるいは $x_1-d=x_0$ に する。以上のような方針でn本の試験片について実験する。これが up and down 法である。Dixon & Mood によれば,ある応力レベ ルにおける疲労強度が正規分布していて、かつ、 d がその正規分布 の標準偏差にほぼ等しい場合には、m、 $\sigma$  の推定値 $\hat{x}$ 、s が次式であ らわされる(5)。

ここに

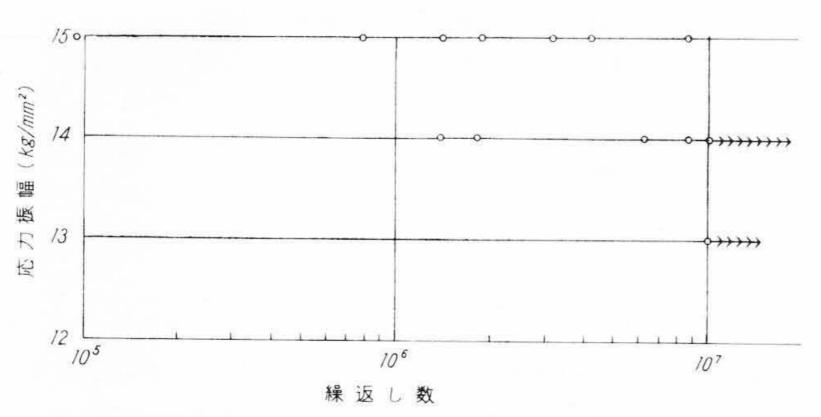
$$A = \sum_{i} i n_{i} \atop B = \sum_{i} i^{2} n_{i}$$
 .....(3)

ただし x': 実験範囲内で最低の応力レベル  $(kg/mm^2)$ 

d: 応力レベルの段階(kg/mm²), 本実験では 1.0kg/mm² とした

i: x'なる応力レベルを i=0 とし、これから上の応力レベルにつけた通し番号、たとえば x'+d なる

日



第4図 No.2 チャージ(a)形試験片の実験値

第4表  $\hat{x}$ , s の実験値  $(kg/mm^2)$ 

試験	片 形 状	疲労強度平均値 (全)		疲労強度標準偏差(s)	
		No.1 チャ ージ	No.2 チャ ージ	No.1 チャ ージ	No.2 チャ
a形試験片	( <i>l</i> = 0mm)	13.9	14.2(14.4)	0.7	0.4(0.4)
b形試験片	(l=10mm)	13.3	13.8	0.7	0.4
b形試験片	(l=25 mm)	13.1	13.3	0.4	0.3
b形試験片	(l=45 mm)	13.1	13.1(13.3)	0.4	0.4(0.6)
c形試験片	(三角形断面)		15.1		0.5

応力レベルは i=1, x'+2d の応力レベルでは i=2 N: 各応力レベルで折損した試験片の総数, あるいは 折損しなかった試験片の総数

 $n_i$ : i 番目の応力レベルで折損した試験片の数,あるいは折損しなかった試験片の数

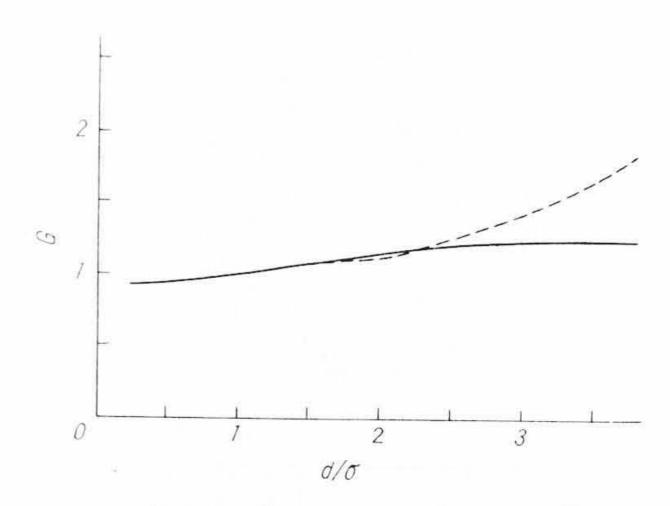
ここで、(1)式の()内の複号は、折損した試験片で計算する場合(-)をとり、折損しなかった試験片で計算する場合(+)をとる。この場合、折損したもの、折損しないものの両者につきNを計算し、この値の小さい方で計算するのがよい。

金属材料の疲労強度は一般にほぼ正規分布していることが認めら れており Ransom & Mehl<sup>(7)</sup> が疲労試験に up and down 法をとり 入れて以来,この方法は疲労強度の実験法として多くの研究者(6)(8) によって採用されている。筆者らもアルミニュウム合金の疲労強度 が正規分布するものとして、(1)、(2)式を用いて $\hat{x}$ 、sを計算するこ とにした。実験により得られた S-N 曲線の一例を第4図に示すが、 同図よりわかるように、実験値はかなりばらついており、このままで は S-N 曲線を描くことが困難であるけれども、(1)、(2)式から各 形状の試験片の $\hat{x}$ , s を求めると第4表のようになる。ここで、No. 2 チャージにおいては試験片本数12本のものと24本のものがあるの で、24本のものは、このうち No.1 試験機で実験した12本のデー タのみを用いて計算し、試験片本数を12本に統一した。ただ、参 考のため、24本全部を用いて計算した結果を同表中の()内に記入 した。 また計算に際し、(a)形試験片では試験片中央部の形状係 数 $\alpha$ =1.02 となるので<sup>(9)</sup>, 公称応力を 1.02 倍した応力について疲労 強度を求めた。疲労強度の平均値は, (c)形, (a)形試験片, (b) 形の l=10, 25, 45 mm の順に低下しており, No. 1, 2 チャージ ともにこの傾向は一致している。また、この強度低下の順位は、試 験片において破壊の危険にさらされる部分の表面積が増加する傾向 ともよく一致しており、特に(c)形試験片の強度が(b)形、l=45 mm のものに比べて約2 kg/mm²も高いことは注目に値する。

No. 2 チャージにおいて、試験片本数を 12 本にした場合と 24 本にした場合の  $\hat{x}$ 、s にはいずれもあまり顕著な差はなかった。

#### 4.2 疲労強度の有意差検定

各形状の試験片についてそれぞれ疲労強度の平均値を求めた結果は第4表のようになり、試験片の形状によってかなりの差がみとめられるので、各疲労強度間の有意差検定を行なった。このためには



第5図 修 正 係 数 G の 値(4)

第5表  $\hat{x}$  の信頼限界  $(kg/mm^2)$ 

Λ# 4÷	片 形 状	₹ の 95% 信頼限界		€ の 90% 信頼限界	
試 験		No.1 チャ ージ	No.2 チャ ージ	No.1 チャ ージ	No.2 チャ ージ
a形試験片	(l=0 mm)	$13.9 \pm 0.7$	14.2±0.6	$13.9 \pm 0.5$	14.2±0.5
b形試験片	(l=10 mm)	$13.3 \pm 0.6$	$13.8 \pm 0.5$	$13.3 \pm 0.5$	13.8±0.4
b形試験片	(l=25 mm)	$13.1 \pm 0.4$	$13.3 \pm 0.5$	$13.1 \pm 0.3$	$13.3 \pm 0.4$
b形試験片	(l=45 mm)	$13.1 \pm 0.4$	$13.1 \pm 0.6$	$13.1 \pm 0.3$	$13.1 \pm 0.5$
c形試験片	(三角形断面)	_	$15.1 \pm 0.5$		$15.1 \pm 0.4$

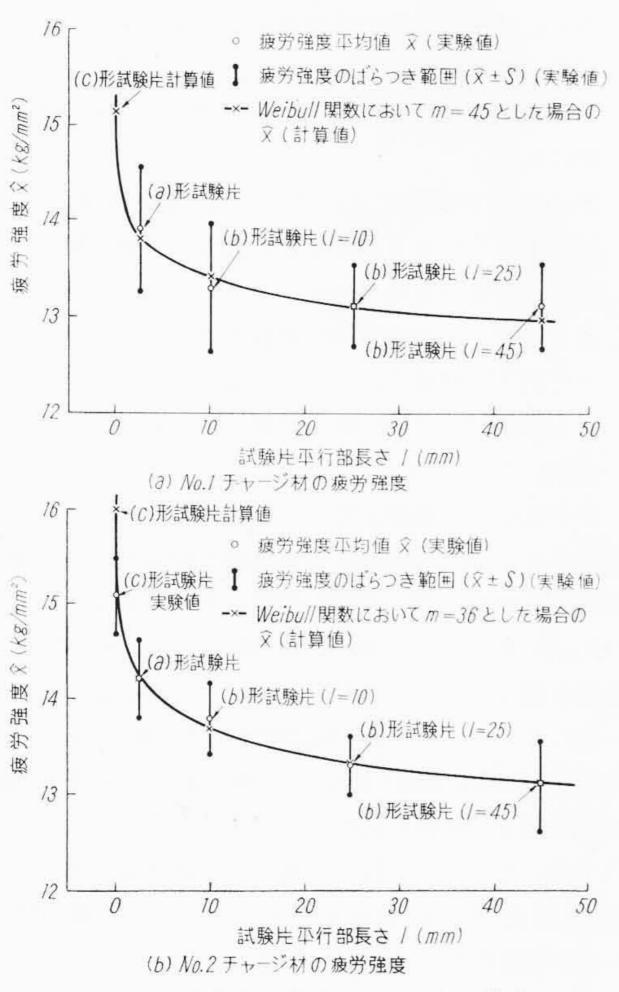
各疲労強度の平均値 $\hat{x}$ の分散を求める必要がある。Dixon & Mood によれば $^{(5)}(1)$ 式を用いて計算した $\hat{x}$ の標準偏差 $\sigma_{\hat{x}}$ は

$$\sigma \hat{\mathbf{x}} = \frac{G\sigma}{\sqrt{N}}$$
 ......(4)

ここに G: 修 正 係 数

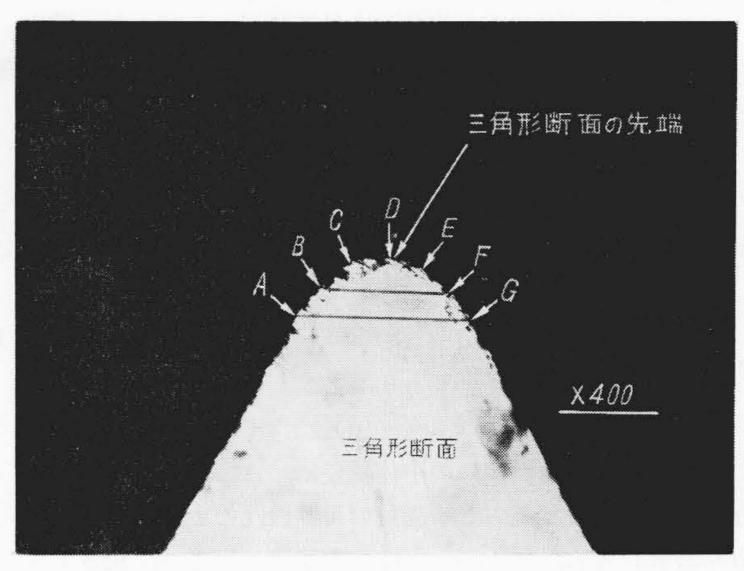
であらわされる。ただし、Gは $d/\sigma$ の関数であり、第5図のような 値をとる(5)。同図中の実線は平均値が丁度応力レベルの一つに一致 した場合, 点線は, 平均値が応力レベルの中間にきた場合をあらわ す。一方, Brownlee ら<sup>(6)</sup>は, 10本および5本の試験片で up and down 法を適用した場合の  $E(\hat{x}-m)^2$  を詳細に計算し、 $x_0-\hat{x}\leq 2d$ 、  $d/\sigma < 3/2$  の場合には、 $E(\hat{x}-m)^2$  の方が常に(4)式であらわされる  $(\sigma_s)^2$  よりも小さく、したがって m の推定誤差を  $\sigma_s$  で計算するこ とは安全側であることを示した。今回の実験では $d=1.0 \text{ kg/mm}^2$ であるから、第4表に示したsからd/sを計算すると、d/sはほぼ 2の前後となり、 $d/\sigma < 3/2$ を必ずしも満足してはいないかも知れ ないが、試験片本数が 10 本よりも多いので、この場合も  $(\sigma s)^2$  は  $E(\hat{x}-m)^2$  をほぼ正しくあらわしているものと考え, (4) 式を用い て â の信頼限界を計算した。すなわち, σε にt-分布表の値を掛ける ことにより、各形状の試験片の $\hat{x}$ の95% 信頼限界および90% 信頼 限界を計算すると(5)第5表のようになる。この結果から、たとえば No. 2 チャージ (a) 形試験片の 90% 信頼限界下限の値は 13.7 kg/  $mm^2$  であり、(b) 形 l=45 mm の上限は 13.6 kg/mm<sup>2</sup> となる。し たがって両者は90%の信頼度で有意差があるといえる。同様の考 え方で、No. 1, 2 チャージとも(a)形, (c)形試験片の疲労強度の 平均値は(b)形 l=45 mm のものに対して90% の信頼度で有意差 があるといえそうである。 これに反し、(b)形の試験片相互間に は、本実験の範囲では有意差は認められなかった。しかし、No. 1, 2 チャージともに (b) 形 l=10 mm のものは (b) 形 l=45 mm のも のよりも約 $0.2 \sim 0.7 \text{ kg/mm}^2$ 程度高い疲労強度となっているので、 さらに試験片本数を増して実験を行なえば, (b)形試験片相互間に も有意差が出てくるものと考えられる。

# 4.3 破壊の危険にさらされる表面積の大小と疲労強度の関係 前節での検定の結果, (a), (c) 形試験片の疲労強度は(b) 形 l=45 mm のものに比べて有意差がみとめられ, 破壊の危険にさら



第6図 試験片平行部長さと疲労強度

される表面積の大小による寸法効果のあることが予想される。この 関係をさらに詳しくしらべるため、横軸に試験片平行部長さしをと り、縦軸に疲労強度をとって第4表の結果をプロットすると第6図 のようになる。(a)形試験片は厳密には平行部がなく、l=0 mm と なるが、これを、l=0 mm の位置にプロットするわけにはゆかな い。なぜならば、試験片中央部、数 mm の範囲では断面係数はほ とんど変わらず, 試験片中央から左右に 1.0 mm および 2.0 mm は なれた所の断面係数は中央の断面係数よりもそれぞれ約 0.5% およ び 1.5% 大きいだけである。 したがって、中央から左右に 1.0 mm および 2.0 mm はなれた所の表面応力は、中央の表面応力に比べて 0.5% および 1.0% 低下する程度である。 ゆえに試験片中央部の数 mmの範囲は、いずれも破壊の危険にさらされていると考えなけれ ばならない。事実, (a)形試験片の破断位置を実測したところ, ほ とんどが試験片の中央部約 2.5 mm の範囲に分布しているので, (a)形試験片の値は l=2.5 mm の位置にプロットした。(a)形試験 片の疲労強度のばらつきを%であらわすため、 $2s/\hat{x}$ なる値を第4表 の数値から計算すると、No.1, 2 チャージではそれぞれ約 0.1 およ び0.06となる。このことは、疲労強度が約6~10%の範囲でばらつ くことを意味し、(a)形試験片の最小断面における表面応力よりも 約6~10%低い表面応力を有する断面においてもなお破断する可能 性があるように思われる。このような断面は試験片中央から左右に 4.0~5.0 mm はなれた所の断面である。しかし、実験の結果は試験 片の破断位置の大部分が中央部約 2.5 mm の範囲(中央から左右に 1.25 mm の範囲) に分布しており、その外側にはみ出たものはほと んど無かった。このちがいが何によるものか、原因はいまだ明らか ではないが、今後検討しなければならない問題である。また、(c) 形試験片は、き裂が最初に生ずると思われる三角形先端の形状が第 7図 のような形をしているので、面積  $h \times l_e$  (ここに h: 弧 ADG の 長さ≒0.06 mm とした。 l<sub>c</sub>: 三角形断面を有する部分の軸方向長さ =15 mm) を破壊の危険にさらされる表面積と考え, 9 mm Ø 試験 片の平行部表面積が $h \times l_c$  に等しくなるよう, 平行部等価長さ $l_{ceq}$  を 求め、この位置にプロットした。 計算の結果  $l_{ceq} = 0.03 \text{ mm}$  となっ



第7図 (c)試験片断面の頂部先端の形状 (×400)

た。ただこの場合、hとして弧 ADG が果して適当かどうか確実な根拠はないけれども、次の事実はその不当でないことを示すものといえるであろう。すなわち、かりに弧 ADG の代わりに弧 BDF を採用して $l_{ceq}$  をもとめても、第6図(b)の結果には大きな変動はなく、弧 ADG を採用した場合(c)形試験片の疲労強度の計算値が16.0 kg/mm² となり、弧 BDF を採用すると16.2 kg/mm² になる程度である。したがってhのとりかたは、寸法効果の傾向にはそれほど敏感には影響せず、おおよその見当でhを弧 ADG と仮定してもさしつかえないと考えた。また $\overline{AG}$ 上の応力は $\overline{D}$ 点の応力に比べて約0.5%低いのみであり、(a)形試験片において、試験片中央と、それから左右に1.25 mm はなれた表面の応力が約0.7% 異なっていることとよく似ている。第6図の自丸印は各形状の試験片の疲労強度の平均値を推定した値であり、黒丸をむすんだ範囲はその標準偏差の推定値をあらわす。

破壊の危険にさらされる表面積の大小による寸法効果の原因としては、材料の不均一性、強度のばらつきが考えられる。すなわち、材料の各点における疲労強度はある統計的な分布関数にしたがってばらついており、最も弱い部分の疲労強度で試験片全体の疲労強度が決定される。ゆえに破壊の危険にさらされる表面積か大きくなれば、さらに低い疲労強度の部分が出現する確率が増すので、試験片全体の疲労強度も低下する。疲労強度の分布に関しては従来から種々研究されており、正規分布をすると考えるもの、Weibull 分布であるとするものの二説があり、いまだ明確な結論は出ていない。本研究においては、前節において正規分布と仮定しており、ここにおいても正規分布と仮定して以下の計算をすべきであるが、後に述べるようにm>2.5となるため、正規分布はWeibull 分布ときわめて近い状態となり、かつ、

- (1) 寸法効果をあらわす式は、Weibull 分布を用いた方がはるかに簡単な形になり、また引張り強度に関するこの種の寸法効果を論じたものも Weibull 分布として計算したものがほとんどである<sup>(10)</sup>。
- (2) Weibull 分布において、均一性係数 m>2.5 の場合は、分布の形が正規分布にきわめてよい近似を示す $^{(11)}$ 。一方、供試材料の m は後述するように  $36\sim45$  の範囲にある。

などの理由から、以下の計算にあたって、強度の分布は Weibull 分布に従うものと仮定した。このことは、前節の正規分布と仮定して求めた結果と実際上の矛盾はないと考えられる。 Weibull 分布関数は次の式で定義される $^{(10)}$ 。

ここに  $G_n(x)$ : 材料からn個のクラックを抽出したときのクラ

ックの疲労強度最低値がxを越えない確率

日

F(x): 任意のクラックの疲労強度がxを越えない確率

m: 材料に固有の常数(均一性係数とも呼ぶ)

α: 材料に固有の常数

ただし、ここにいうクラックとは、肉眼で見えるき裂ではなく、 Griffith のクラックのように材料の中に存在するミクロな弱点をい う。今

$$-\log_{e}[1-G_{n}(x)] = -n\log_{e}[1-F(x)] = B.....(7)$$

とおき, クラックの密度を ε とすると

$$dB = \{-\log_e[1 - F(x)]\}c \, dV \dots (8)$$

ここに dV: 試験片の微小体積要素

となる。横堀教授は長方形断面材の単純曲げの場合につき(8)式からBを計算しておられるが、同様の方法で、直径r、長さlなる円柱形試験片で回転曲げ疲労試験を行なった場合のBを計算すると

$$B = \alpha c \frac{2V}{m+2} x_r^m \dots (9)$$

ここに V: 直径r, 長さlなる円柱形試験片の体積

xr: 試験片表面の応力

のようになる。ここで $\alpha$ , c, m は材料に固有の常数であり、試験片の形状として直径rを一定とし、長さlのみが変化するものと考えると

$$B = k l x_r^m \dots (10)$$

ここに k: 常 数

1: 試験片平行部長さ

と書きかえることができる。 ここで、試験片の 50% 破断疲労強度 (疲労強度の平均値) を $\hat{x}$ とし、この場合を (10) 式に代入すると、 $G_n(x)=0.5$  なるゆえ、B=0.693 となり、(10) 式は

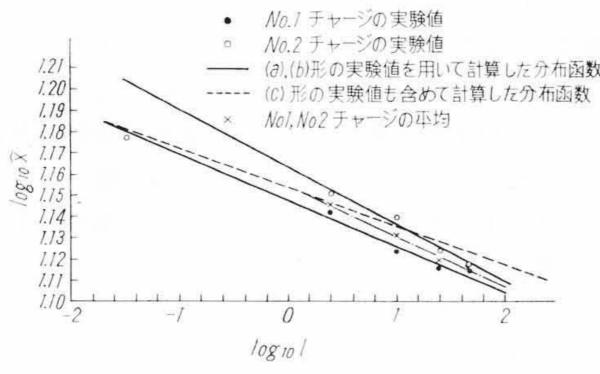
$$l\,\hat{\boldsymbol{x}}^{m} = \frac{0.693}{k} \quad \dots \tag{11}$$

となる。(11)式の対数をとると

$$\log_{10} l + m \log_{10} \hat{x} = c$$
......(12)  
ここに  $c$ : 常 数  $\left( = \log_{10} \frac{0.693}{k} \right)$ 

となる。これは円柱形試験片の回転曲げ疲労試験の場合につき、試験片平行部長さと疲労強度の関係を示した式であり、両者の対数を縦、横軸にとれば直線関係にあることを知る。

横軸に  $\log l$  を、縦軸に  $\log \hat{x}$  をとって、第4表の結果をプロットすると第8図のようになり、No. 1、2 チャージとも、多少のばらつきはあるがいずれも直線と考えてもよさそうに思われる。そこで実験結果に(12)式を適用し、最小自乗法により常数 m, c をもとめた。第8図中の実線は(a)、(b)形試験片の結果のみを用いて求めた実験式であり、点線は(c)形試験片の実験値をも含めて求めたNo. 2 チャージの実験式である。実線と点線ではかなり傾斜が異なっており、Weibull の分布関数としてどちらをとるのが正しいかは、これだけから決定することは困難で、さらに研究する必要があるが、



第8図  $\log l$   $-\log \hat{x}$  線 図

- (1) No. 1, 2チャージの実験値を平均するとそれぞれ図中の× 印のようになり、これはほとんど一直線上に並ぶ。これは (c)形試験片の実験値を除いて求めた二本の実線のほぼ中 間にある。
- (2) Stulen (12) の実験によれば、平板の繰返し曲げの場合、機械仕上げしたままのするどい縁をもった試験片の疲労強度は、縁に丸みを与えたものよりも低い。また Dolan (13) もダイヤモンド形の試験片の疲労強度が円形断面のものに比べて約7%程低くなることを見いだしている。以上はいずれも鉄鋼材料についての結果であるが、アルミニウム合金においても、(c)形試験片においては、するどい縁のためやや低い疲労強度となっているかも知れない。

などの理由から、(c)形試験片の実験値を除いて求めた第8図の実 線から得られるmおよび c の値を採用した。このようにして求めた c, m を(11)式に代入し、l=0.03, 2.5, 10, 25, 45 mm の場合の  $\hat{x}$  を計 算すると第6図×印のようになり、(a)、(b)形試験片の実験結果と はよく一致しているが、(c)形試験片では計算値 16.0 kg/mm² に 対して実験値  $15.1 \, \mathrm{kg/mm^2}$  となり、 第 4 表に示す  $\hat{x}$  の信頼限界か ら考えて実験値と計算値の間には有意差がみとめられる。この差は 前述(2)で述べたするどい縁の効果あるいは試験片表面の機械加工 による加工硬化層の影響かもしれない。 また 第8図 の実線を Weibull の分布関数として採用した場合, 均一性係数mは No. 1 チ ャージでm=45, No. 2 チャージではm=36 となり、かなり高い値 となる。すなわち m>2.5 となっているので、この場合 Weibull 関 数は正規分布にきわめてよく近似しており、4.1節および4.2節で 強さの分布を正規分布と仮定して計算しながら, 4.3 節では Weibull 分布を用いた点, 厳密には矛盾を含んでいるが, 実用上はほぼ許容 されると思う。

# 5. 結 言

直径  $9 \text{ mm} \phi$ , 平行部長さがそれぞれ 0, 10, 25, 45 mm の回転曲げ疲労試験片,および,一辺 9 mm の正三角形断面をした繰返し曲げ試験片を AC8Aアルミニウム合金で作り、 $10^7$ 回の繰り返しに耐える疲労強度を up and down 法により求めて、破壊の危険にさらされる表面積の大小が疲労強度に及ぼす影響をしらべた。得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 試験片の疲労強度は、破壊の危険にさらされる表面積が減少するに従って増加しており、この意味における寸法効果が明らかに認められる。すなわち、本実験の範囲では、平行部長さ45 mmの回転曲げ試験片に対し、平行部長さ0 mmのものおよび三角形断面の繰返し曲げ試験片は90%の信頼度で疲労強度が高いと断言できる。平行部長さ10,25,45 mmの試験片相互間では本実験の範囲で有意差は認められなかったが、No.1,2 チャージとも平行部長さ10 mmのものは45 mmのものに比べて約0.2~0.7 kg/mm²高い疲労強度を示し、さらに試験片本数を増せば有意差が認められると思われる。
- (2) 上記寸法効果は、Weibull の分布関数において均一性係数 m を、36~45 に選んで計算した疲労強度増減の傾向とよく一致 する。ただ三角形断面の疲労強度の実測値は計算値よりも約1kg/mm² 低い値を示したが、これは三角形先端のするどい縁の効果および試験片表面の機械加工による加工硬化層の影響によるものかもしれない。この点に関しては今後検討を要する。
- (3) 平行部長さ 45 mm の試験片の疲労強度が約 13 kg/mm² であるのに対し、破壊の危険にさらされる表面積がこれの 1/1,500 程度に減少した試験片(三角形断面の試験片にほぼ相当)では疲労強度が約 15~16 kg/mm² となり、2~3 kg/mm² も高い。この

ことは鋳造品のピンホール、あるいはき裂部先端など、きわめて 微小な欠陥による疲労強度の低下が比較的わずかであることを示 唆するように思われさらに研究すべき重要なことと思われる。

本研究を行なうにあたり、終始ご懇篤なご指導をいただいた九州 大学石橋正教授、日立製作所笠戸工場飯島弘第1研究課長、統計的 手法に関しご注意をいただいた当工場品質管理室山川氏に厚く感謝 する。また実験および計算にご協力いただいた第1研究課富永君に 感謝する。

# 参考文献

- (1) 石橋: 金属の疲労と破壊の防止 63 (昭 29-12, 養賢堂)
- (2) 石橋: 金属の疲労と破壊の防止 27 (昭 29-12, 養賢堂)
- (3) 大内田, 西岡, 久保木: 日立製作所日立研究所研究報告 4458 号(昭38-2)

- (4) W. Weibull: Trans. Roy. Inst. Tech. Stockholm, No. 27 (1949)
- (5) W. J. Dixon, A. M. Mood: Journ. Amer. Statist. Ass, 43, 241, 109 (1948)
- (6) K. A. Brownlee et al: Journ. Amer. Statist. Ass, **48**, 262 (1953)
- (7) J. R. Ransom, R. F. Mehl: Symposium on Fatigue with Emphasis on Statistical Approach–II ASTM (1952)
- (8) たとえば R. Roeloffs, F. Garofalo: ASTM. Proceedings, 56, 1081 (1956)
- (9) R. E. Peterson: Stress Concentration Design Factors, 50 (1953, John Wiley & Sons.Inc.)
- (10) 横堀: 材料強度学 86 (昭 33-11, 技報堂)
- (11) 上野: 材料試験 9, 81, 423 (昭 35)
- (12) 横堀: 材料強度学 201 (昭 33-11, 技報堂)
- (13) T. J. Dolan et al: Trans. ASME, 72, 469 (1950)

# ama ammontant more mys

# 特 許 の 紹 介



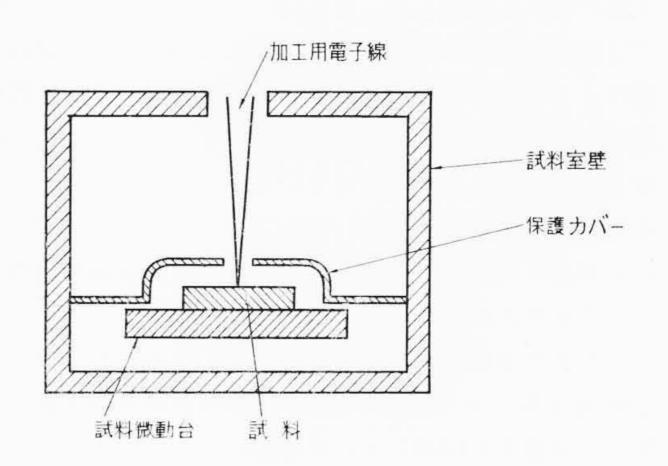
特許第404916号 (特公昭37-14041)

木村博一

# 電子線による加工装置

電子流密度が5A/cm²程度以上の電子線を加工用として用いる電子線加工装置においては、電子線の照射を受けた試料の一部が蒸発し、加工室の器壁や試料取付台等に付着して汚損させ、その装置の清掃手入れ等をはなはだ厄介にしたり、材料の異なる試料を同一加工装置で加工する場合などでは材料次第で互いに悪影響を及ぼす等の欠点がある。

この発明は上記のような欠点を改善するために、電子線によって加工される試料の近くにこれをとりまき、試料よりの蒸発粒子の飛散を防ぐようにした保護蔽いを設けることを特長とするものである。このようにして電子線密度の大きい場合にはじめて問題となる電子線照射時の不都合な蒸発粒子の飛散をきわめて簡易に防止することができる。 (永 田)



特許第306883号(特公昭37-13384)

沢 田 良 嘉・金 子 洋 一

# 多段周波数逓倍式超高周波電子管

一般に周波数逓倍によって超高周波出力を得る場合,従来の電子管では周波数逓倍比が高くなると,必要な高調波出力が非常に小さくなるという欠点がある。

この発明はこのような欠点を改良した電子管に関するもので、図に示すように、電子銃から射出された電子流を共振周波数  $f_1$  なる共振器 I を通過させた後、さらに  $f_2=mf_1$ 、 $f_3=nf_2$ ……(m、n……は正の整数)なる共振周波数の共振器系,II、III……を通過させ、これら共振器系の少なくとも 1 つを複数個の空胴共振器と互いにマイクロ波的に結合させ、かつ隣接する空胴共振器内のマイクロ波電界を互いに逆位相に励起させるように構成すると共に、その電子走向角が  $2n'\pi$ ~(2n'+1) $\pi$  ラジアン(n': 正の整数)であるように構成したものである。このような構成を有する電子管は極めて増幅度の大きい多重空胴共振器を用いているので電子流中に含まれる高周

波成分を大きい増幅度で選択増幅することができ, さらに二段以上 にすることによって逓倍比の高い超高周出力を能率よく取り出すこ とができる。 (水 本)

